

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П. Н. Лебедева Российской Академии наук

На правах рукописи

Шутов Алексей Викторович

**Нелинейные процессы при усилении мощных субпикосекундных УФ
лазерных импульсов в KrF лазерной системе и их распространении в
атмосфере**

Специальность 01.04.21—Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва 2020

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Физическом институте им. П. Н. Лебедева РАН (ФИАН).

Научный руководитель:

кандидат физико-математических наук

Зворыкин Владимир Дмитриевич (ФИАН)

Научный консультант:

кандидат физико-математических наук

Устиновский Николай Николаевич (ФИАН)

Официальные оппоненты:

Чекалин Сергей Васильевич

доктор физико-математических наук, профессор, заведующий лабораторией Спектроскопии ультрабыстрых процессов отдела лазерной спектроскопии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института спектроскопии Российской академии наук (ИСАН)

Кандидов Валерий Петрович

доктор физико-математических наук, профессор кафедры общей физики и волновых процессов Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова (МГУ)

Ведущая организация:

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»»

Защита диссертации состоится «18» мая 2020 года в 11:00 часов на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 на базе Физического института им. П. Н. Лебедева РАН по адресу: 119991, г. Москва, Ленинский пр-т, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН, а также на сайте www.lebedev.ru.

Автореферат разослан «_____» _____ 2020 г.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.023.03

доктор физико-математических наук

А. С. Золотько

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена изучению нелинейно-оптических явлений при усилении мощных 248 нм лазерных импульсов в KrF усилителях и их распространении в атмосфере.

Актуальность проблемы

Актуальность работы обусловлена тем, что короткая длина волны излучения KrF лазера $\lambda = 248$ нм предпочтительна для большого числа прикладных задач. Она оптимальна с точки зрения фокусировки и глубокого проникновения лазерного излучения в плазму, что в сочетании с высоким коэффициентом полезного действия KrF лазера делает его одним из основных кандидатов на роль драйвера для лазерного термоядерного синтеза (ЛТС), в особенности при реализации перспективной схемы ударного зажигания [1, 2]. С другой стороны УФ излучение имеет преимущество при фотоионизации газовых сред. Большая энергия кванта (5 эВ для KrF лазера) позволяет эффективно набирать свободные электроны как за счет прямой, так и резонансно-усиленной многофотонной ионизации (МФИ) при сложении сравнительно небольшого числа фотонов K (обычно $K = 2 \div 4$). В отсутствие лавинной ионизации (оптического пробоя) это делает возможным создание равномерных протяженных плазменных каналов с варьируемой плотностью электронов. Подобная плазма интересна для задач, связанных с управлением высоковольтными разрядами, молниезащитой, направленной транспортировкой СВЧ излучения по плазменным волноводам. Все эти задачи требуют как оптимизации мощных источников УФ излучения, так и исследования физики нелинейного распространения УФ излучения в атмосфере и других прозрачных средах.

Процессы самофокусировки лазерного пучка [3, 4] и филаментации мощного излучения [5- 7], ионизации среды [8], в том числе в филаментах, в случае распространения УФ излучения мало исследованы, и имеют существенные отличия от аналогичных процессов, протекающих при распространении видимого и ИК излучения. Большой интерес представляют сечения МФИ для компонентов воздуха, константы скорости релаксационных

процессов в атмосферной плазме. Крайне редко в работах по измерению этих параметров учитывается влажность исследуемого воздуха, которая, как оказалось, играет решающую роль, как в процессах образования, так и распада плазмы.

Одним из способов получения мощного УФ излучения является усиление ультракоротких УФ импульсов (УФ УКИ, импульсы с длительностью менее 1 пс) в KrF лазерных системах. Характерной особенностью KrF активной среды является обусловленное столкновительным тушением короткое время жизни верхнего лазерного уровня $\tau_c \approx 2$ нс, тогда как в твердотельных активных средах, например, в Nd:YAG лазерах, это время может достигать нескольких сотен микросекунд. В связи с этим в KrF лазере принципиально невозможно длительное накопление энергии для реализации активной либо пассивной модуляции добротности. Поскольку характерные длительности накачки, составляющие от 10 (для электрического разряда) до 500 нс (для электронных пучков), существенно превышают время жизни τ_c , эффективный энергосъем на всем протяжении импульса накачки достигается за счет использования многопроходных и многопучковых схем усиления. В подобных системах, как правило, игнорировалась возможность существенных нелинейных потерь при усилении, ввиду низкой нелинейности самой газовой активной среды [9,10]. Однако, необходимость использования многопроходовых и многопучковых схем усиления приводит к наличию длинного, ~нескольких десятков метров, воздушного тракта усиления и большого числа проходных оптических элементов, таких как окна усилителей, пространственных фильтров, мишенной камеры и т.д. Все эти элементы, в отличие от активной среды, обладают существенной керровской нелинейностью. Ввиду высокой ~ТВт мощности импульсов, достижимой при усилении, которая значительно превышает критическую мощность самофокусировки УФ излучения $P_{cr}=0.1$ ГВт в воздухе или $P_{cr}=3$ МВт в проходной оптике из CaF₂, необходимо учитывать нелинейные процессы в воздушном тракте усиления и окнах усилителей, связанные с самофокусировкой и филаментацией излучения.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы являлось экспериментальное исследование нелинейных явлений при распространении в прозрачных средах мощного KrF лазерного излучения, процессов образования и распада плазмы.

Исходя из цели работы, решались следующие **задачи**:

1) Исследование механизмов фотоионизации УФ лазерным излучением на длине волны 248 нм атмосферного воздуха и его основных компонентов (N_2 , O_2 , H_2O).

2) Исследование механизмов гибели электронов в воздухе при различных плотностях фотоионизационной плазмы, измерение характерных времен жизни в воздухе с различным содержанием влаги и при различных напряженностях приложенного электрического поля.

3) Исследование условий возникновения и длины затухания филаментов в широкоапертурном лазерном пучке с субтераваттной пиковой мощностью при многопроходовом усилении в KrF активной среде, измерение параметров филаментов: переносимой мощности, диаметра, интенсивности.

4) Исследование влияния самофокусировки и множественной филаментации лазерного излучения на нелинейные потери в проходной оптике, лазерной активной среде при многопроходовом усилении УКИ.

5) Разработка методов подавления филаментации лазерного пучка и снижения связанных с ней нелинейных потерь излучения за счет явления резонансной самоиндуцированной дефокусировки излучения в Хе.

Научная новизна работы

1. До настоящей работы основным механизмом фотоионизации атмосферного воздуха 248-нм лазерным излучением считалась прямая трёхфотонная ионизация кислорода, а вклад других компонентов воздуха считался пренебрежимо малым. Полученные результаты свидетельствуют, что в воздухе доминирующим процессом ионизации является резонансно-усиленная

многофотонная ионизация молекул воды. Ионизация молекулярного азота также носит резонансный характер, а её вклад в ионизацию воздуха сопоставим с ионизацией кислорода. В работе были впервые измерены величины эффективного сечения резонансно-усиленной МФИ паров воды и молекулярного азота, уточнено сечение прямой МФИ кислорода.

2. Получены экспериментальные данные по распаду электронной компоненты фотоионизационной плазмы в атмосферном воздухе в широком диапазоне влажностей воздуха ($0 \div 2.3\%$ относительно полного числа молекул) и напряженностей приложенных электрических полей ($0.2 \div 8$ кВ/см). Получены уточненные данные по скорости трехчастичного прилипания электронов к кислороду в воздухе в зависимости от влажности воздуха и напряженности поля.

3. Измерены параметры множественных филаментов в широкоапертурном УФ лазерном пучке с тераваттной пиковой мощностью и связанные с ними нелинейные потери в окнах KrF усилителей из CaF_2 ; показано, что наряду с ненасыщаемыми потерями в активной среде усилителей они являются основным фактором, ограничивающим выходную энергию усиливаемых импульсов.

4. Впервые экспериментально продемонстрировано подавление множественной филаментации излучения KrF лазера на длине волны $\lambda = 248$ нм за счет двухфотонного резонанса с $6p[1/2]_0$ состоянием в ксеноне и связанным с ним большим по абсолютному значению отрицательным нелинейным показателем преломления.

Практическая ценность работы

Измеренные в работе сечения многофотонной ионизации и константы скорости плазмохимических процессов могут быть применены при численном моделировании нелинейного распространения УФ излучения в воздухе и других газовых средах, а также процессов в плазме газового разряда, в атмосфере и ионосфере Земли.

Обнаруженный высокоэффективный способ наработки электронов в воздухе за счет резонансно-усиленной многофотонной ионизации паров воды УФ лазерным излучением может быть использован для создания плазменных каналов и волноводов с целью управления высоковольтными разрядами, транспортировки СВЧ излучения и аналогичных задач.

Способ подавления самофокусировки и филаментации в среде с отрицательным нелинейным показателем преломления может рассматриваться как дешевая альтернатива усилению чирпированных импульсов.

Защищаемые положения

1. Для импульсного лазерного излучения субпикосекундной и наносекундной длительности с длиной волны 248 нм основной вклад в многофотонную ионизацию атмосферного воздуха этим излучением вносит резонансно-усиленная многофотонная ионизация паров воды.
2. В низкоплотной ($<10^{14}$ см⁻³) плазме в воздухе время жизни электронов в процессе трехчастичного прилипания к кислороду растет с ростом напряженности приложенного постоянного электрического поля и снижается с увеличением концентрации водяных паров.
3. Множественная филаментация коллимированного широкоапертурного пучка приводит к нелинейным потерям в оптических элементах и активной среде K₂F₂ усилителей при многопроходовом усилении импульсов. Нелинейное поглощение и рассеяние излучения, а также уширение спектра за пределы полосы усиления ограничивают выходную энергию субпикосекундных УФ импульсов в K₂F₂ усилителях.
4. Использование ксенона, имеющего отрицательный нелинейный показатель преломления на длине волны 248 нм, позволяет подавить мелкомасштабную самофокусировку и филаментацию УФ излучения с тераваттной пиковой мощностью.

Апробация результатов работы

Основные результаты диссертации были опубликованы в **11** статьях в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science, а также в **7** трудах научных конференций. Список публикаций приведен на стр. 22-23.

Результаты работы лично докладывались диссертантом на следующих международных и российских научных конференциях и школах:

1. «International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & International Conference on Lasers, Applications, and Technologies» (ICONO/LAT 2013), 23-26 июня, 2013 г., Москва, Россия.
2. «6th International Conference on The Frontiers of Plasma Physics and Technology» (FPPT-6), 4-8 марта, 2013 г., Габороне, Ботсвана.
3. «15я Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики»», 16-20 ноября, 2014 г., ФИАН, Москва, Россия.
4. «7th International Conference on The Frontiers of Plasma Physics and Technology» (FPPT-7), 13-17 апреля, 2015 г., Кочин, Индия.
5. «The 25th Annual International Laser Physics Workshop» (LPHYS'16), 11–15 июля, 2016 г., Ереван, Армения.
6. «International Conference on Coherent and Nonlinear Optics & International Conference on Lasers, Applications, and Technologies» (ICONO/LAT 2016), 26-30 сентября, 2016 г., Минск, Беларусь.
7. «17 International Conference on Laser Optics 2016» (ICLO 2016), 27 июня-1 июля, 2016 г., Санкт-Петербург, Россия.
8. «8th International Conference on The Frontiers of Plasma Physics and Technology» (FPPT-8), 3-7 апреля, 2017 г., Винья дель Мар, Вальпарейсо, Чили.
9. «The 26th Annual International Laser Physics Workshop» (LPHYS'17), 17–21 июля, 2017 г., Казань, Россия.
10. «International Conference on Ultrafast Optical Science» (UltrafastLight-2017), 3–5 октября, 2017 г., Москва, Россия.
11. «18 International Conference on Laser Optics 2018» (ICLO 2018), 4-8 июня, 2018 г., Санкт-Петербург, Россия.
12. «The 27th Annual International Laser Physics Workshop» (LPHYS'18), 16–20 июля, 2018 г., Ноттингем, Великобритания.
13. «International Conference on Ultrafast Optical Science» (UltrafastLight-2018), 1–5 октября, 2018 г., Москва, Россия.
14. «XVII Workshop On Nuclear Physics» (WONP-XVII), 1-5 апреля, 2019 г., Гавана, Куба.

15. “The 29th Annual International Laser Physics Workshop” (LPHYS’19), 8–12 июля 2019 г., Кёнджу, Республика Корея.
16. “International Conference on Ultrafast Optical Science” (UltrafastLight-2019), 30 октября- 4 ноября, 2019 г., Москва, Россия.

За цикл работ «Формирование плазменных каналов при филаментации мощных ультракоротких лазерных импульсов и управление с их помощью высоковольтными электрическими разрядами» диссертанту в составе авторского коллектива (В. Д. Зворыкин, А. А. Ионин, С. И. Кудряшов, А. О. Левченко, Л. В. Селезнев, Д. В. Сеницын, И. В. Сметанин, Е. С. Сунчугашева, Н. Н. Устиновский) лаборатории газовых лазеров ОКРФ ФИАН была присуждена вторая премия Физического Института им П.Н. Лебедева РАН за 2013 год.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения, списка публикаций автора по теме диссертации и списка цитируемой литературы. Объем работы составляет 179 страниц, включая 54 рисунка и список литературы из 194 наименований.

Личный вклад автора

Все приведенные в диссертации результаты были получены автором лично, либо при его непосредственном участии. Автор принимал участие в определении целей и задач исследования, подготовке и проведении экспериментов, обработке и интерпретации полученных данных, участвовал в написании статей, докладывал полученные результаты на конференциях. Результаты численного моделирования, приведенные в разделе 3.2.3 диссертации, получены совместно с И.В. Сметаниным (ФИАН).

II. КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *Введении* диссертационной работы обосновывается актуальность работы и решаемых задач, описана научная новизна, практическая ценность, дана характеристика методов исследования и краткое содержание работы по главам. Во *Введении* также приведены сведения об апробации результатов работы и положения, выносимые на защиту, описан личный вклад автора.

В *Главе 1* диссертационной работы дано общее представление об особенностях усиления ультракоротких ультрафиолетовых лазерных импульсов и их нелинейного распространения в воздухе.

В разделе 1.1 описаны основные физические процессы в фотоионизационной плазме, создаваемой УФ лазерным излучением. Обсуждаются возможные механизмы фотоионизации основных компонентов воздуха, кинетические процессы в создаваемой плазме. Определены основные имеющиеся в литературе противоречия и расхождения, обуславливающие актуальность проводимых исследований.

В разделе 1.2 рассмотрены основные особенности усиления УФ УКИ в эксимерных газовых средах, а также процессы нелинейного распространения УФ УКИ в контексте усиления в KrF усилителях. Приведен обзор работ по особенностям KrF активной среды и некогерентному усилению УКИ, описаны возможные применения и задачи для подобных источников излучения.

Глава 2 посвящена описанию установки и методов исследования, примененных автором.

В Разделах 2.1-2.4 описаны лазерные источники УФ лазерного излучения, использованные в работе: KrF усилители с накачкой электронным пучком; фемтосекундный $\text{Ti}^{3+}:\text{Al}_2\text{O}_3$ лазерный комплекс с утроением частоты «Старт-248М» производства ООО «Авеста-Проект»; электроразрядный KrF лазер TMSC-150 (Lambda Physik EMG), генерировавший узкополосное излучение, а также схема усиления УФ УКИ от титан-сапфирового стартового комплекса в KrF усилителях с накачкой электронным пучком.

Раздел 2.5 подробно описывает методику диагностики фотоионизационной воздушной плазмы, с помощью которой получена часть основных результатов работы.

В разделе 2.6 отражен перечень использованной регистрирующей аппаратуры и измерительных методик.

В *Главе 3* описано экспериментальное исследование механизмов фотоионизации воздуха импульсным УФ лазерным излучением на длине волны $\lambda=248$ нм и последующей эволюции такой плазмы.

Раздел 3.1 посвящен исследованию механизмов фотоионизации воздуха и его компонентов. Обзор имеющейся литературы в *Главе 1* показал, что имеющиеся данные о механизмах многофотонной ионизации атмосферного воздуха и входящих в его состав газов местами противоречивы, а измеренные сечения фотоионизации отличаются друг от друга на несколько порядков. В данной работе описаны эксперименты, направленные на измерение концентрации электронов, создаваемой лазерным излучением при фокусировке в воздухе и входящих в его состав компонентах.

В процессе эксперимента лазерные импульсы фокусировались линзой с числовой апертурой $NA \approx 0.02$ в датчик фототока, представлявший из себя пару медных трубчатых электродов, к одному из которых было приложено зарядное напряжение. Плазменный канал, создаваемый лазерным излучением, замыкал электрическую цепь датчика, ток в которой, пропорциональный создаваемой лазером концентрации электронов, регистрировался с помощью осциллографа. В этих измерениях пиковая концентрация электронов, создаваемая лазерным излучением, оценивалась как $N_e^0 = u_{max} L K / U_{зар} R_{осц} \pi r_{1/e}^2 e \mu_e$, где u_{max} - амплитуда фототока, L - длина плазменного канала, $r_{1/e}$ - радиус лазерного пучка по уровню $1/e$, K - степень нелинейности процесса фотоионизации, $U_{зар}$ - зарядное напряжение, $R_{осц}$ - сопротивление входа осциллографа, e - заряд электрона, μ_e - подвижность электронов в соответствующем приложенном поле.

Для узкополосного $\Delta\lambda \approx 10^{-3}$ нм излучения электроразрядного KrF лазера, генерировавшего 25-нс импульсы с энергией 0.2 Дж, была получена зависимость концентрации электронов в воздухе от длины волны излучения, при её перестроении вдоль полосы усиления молекулы KrF в диапазоне $\lambda=248.0 \div 248.8$ нм (**Рис. 1а**). Она включала большое количество резонансных линий, которые оказались известны в литературе как двухфотонные

колебательно-вращательные переходы из основного $\tilde{X}^1A_1$ в промежуточное $\tilde{C}^1B_1$ состояние молекул воды [11].

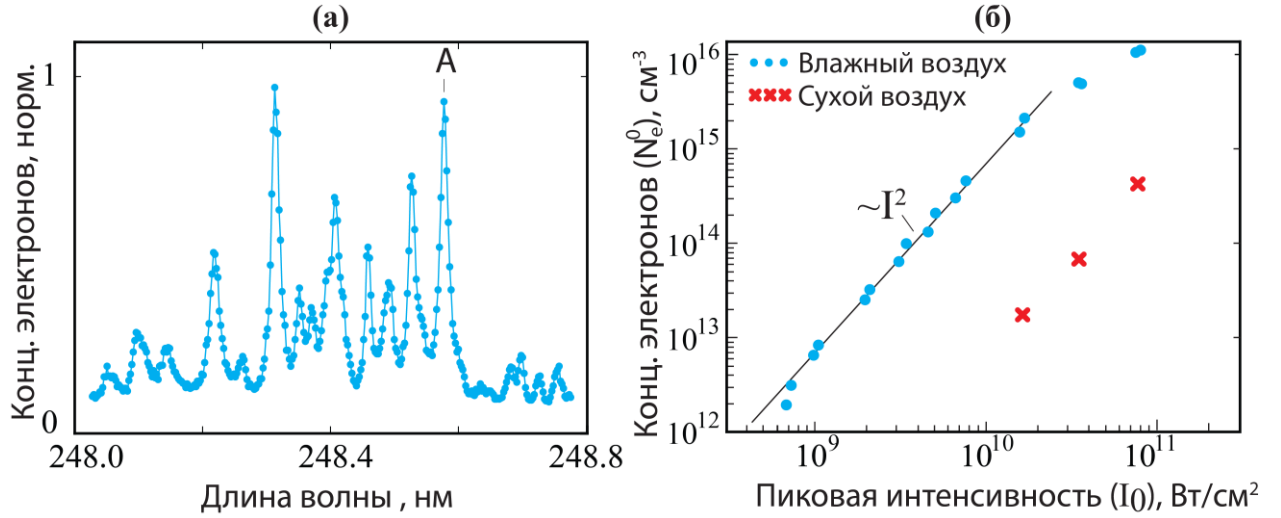


Рис. 1 Экспериментальная зависимость (а) нормированной концентрации электронов от длины волны лазерного излучения. Спектральные пики соответствуют колебательно-вращательной структуре двухфотонных $\tilde{C}^1B_1 \leftarrow \tilde{X}^1A_1$ переходов молекулы H_2O [11]. (б) концентрации электронов от пиковой интенсивности 25 нс лазерного импульса в сухом (кресты) и влажном ($N_{H_2O}=5.8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, точки) воздухе.

Измеренные зависимости концентрации электронов, создаваемой лазерным импульсом, от его пиковой интенсивности для 25-нс KrF лазерного импульса в предварительно осушенном воздухе и воздухе, содержащем $\sim 2.3\%$ молекул H_2O (относительно полного числа молекул), представлены на (Рис. 1б). Здесь $N_{H_2O} = 5.8 \times 10^{17} \text{ см}^{-3}$, соответствует температуре $T=21^\circ \text{C}$ и относительной влажности, близкой к 100%. Эксперимент проводился для длины волны излучения, отмеченной буквой А на Рис. 1а. Как видно, присутствие водяных паров увеличивает выход электронов на несколько порядков. При этом степенная зависимость концентрации электронов от интенсивности лазерного излучения во влажном воздухе $\sim I^2$ свидетельствует о доминировании ступенчатой (2+1) резонансно усиленной многофотонной ионизации (REMPI) водяных паров. Измеренное из зависимости пиковой концентрации электронов от интенсивности эффективное сечение ионизации водяного пара 25-нс лазерными импульсами составило $\sigma_{H_2O}^{(2)} = (9.0 \pm 5.5) \times 10^{-16} \text{ см}^4 \text{ с}^{-1} \text{ Вт}^{-2}$. В случае сухого воздуха ограниченное количество экспериментальных данных

не позволяет сделать достоверного вывода о степени нелинейности, которая укладывается в диапазон $K=2\div3$.

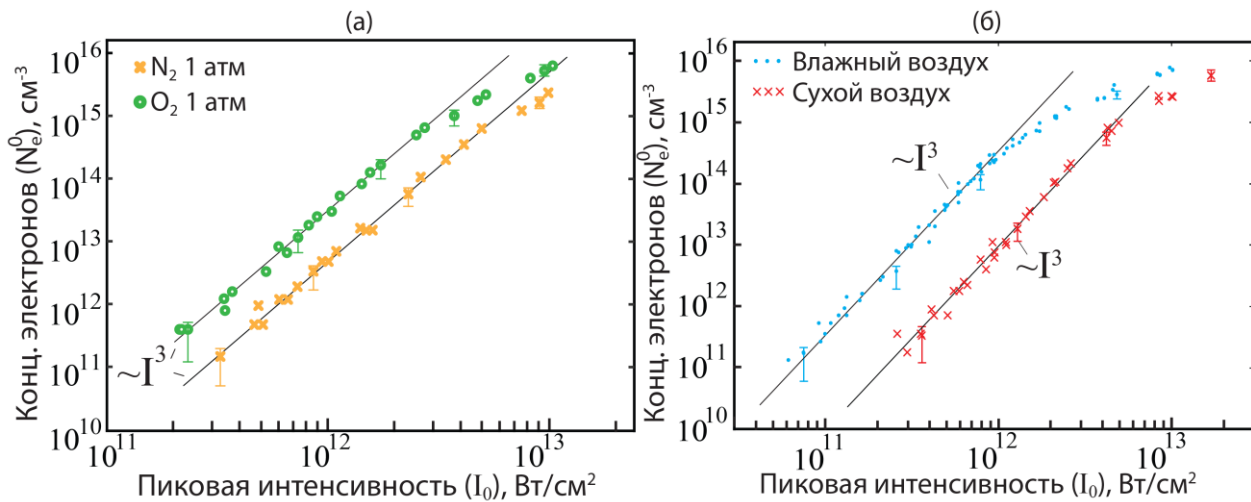


Рис. 2 Экспериментальная зависимость концентрации электронов от пиковой интенсивности 170 фс лазерного импульса в (а) N_2 (кресты) и O_2 (круги) (б) во влажном ($N_{H_2O}=5\times10^{17}\text{ см}^{-3}$, точки) и сухом (кресты) воздухе при давлении $P=1$ атм со степенными аппроксимациями (линии).

Аналогичный эксперимент был сделан с использованием широкополосного $\Delta\lambda\approx1$ нм излучения третьей гармоники титан-сапфирового лазера с $\lambda=248.5$ нм. Было получено, что при ионизации 170 фс импульсами в чистом кислороде наблюдается прямая трехфотонная ионизация, в азоте (3+1) REMPI (**Рис. 2а**). Сравнение сухого и влажного (2.3% H_2O , $N_{H_2O}=5.8\times10^{17}\text{ см}^{-3}$) воздуха, как и в случае узкополосного излучения KrF лазера, показало увеличение концентрации электронов более чем на порядок (**Рис. 2б**).

Из измеренных зависимостей концентрации электронов от интенсивности лазерного излучения были рассчитаны эффективные сечения ионизации кислорода $\sigma_{O_2}^{(3)} = (1.2 \pm 0.5) \times 10^{-29} \text{ см}^6\text{с}^{-1}\text{Вт}^{-3}$, водяных паров $\sigma_{H_2O}^{(3)} = (5.6 \pm 3.8) \times 10^{-27} \text{ см}^6\text{с}^{-1}\text{Вт}^{-3}$, и молекулярного азота $\sigma_{N_2}^{(3)} = (1.7 \pm 0.8) \times 10^{-30} \text{ см}^6\text{с}^{-1}\text{Вт}^{-3}$. Эффективное сечение многофотонной ионизации молекул воды оказалось на 2-3 порядка больше, чем для других компонентов воздуха. Из полученных результатов следует, что при содержании водяных паров в воздухе более 0.07% (соответствует абсолютной влажности при температуре $T= -30$ °C) основным механизмом многофотонной ионизации воздуха лазерным излучением на длине волны 248 нм является ионизация паров воды.

В разделе 3.2 проведено исследование процессов гибели электронов в фотоионизационной плазме. Используя сфокусированные 170 фс УФ лазерные импульсы в качестве дельта-источника свободных электронов, с помощью датчика фототока были получены осциллограммы тока с временным разрешением ~ 1 нс, которые отражали разрешенную во времени гибель электронов в фотоионизационной плазме. Подобрал лазерную энергию таким образом, чтобы начальная концентрация электронов не превышала 10^{13} см $^{-3}$, были получены условия, при которых гибель электронов определялась трехчастичным прилипанием (ТП) электрона к кислороду. Это определялось по временной эволюции осциллограмм, которые в низкоплотной плазме имели экспоненциальную форму, не зависящую от начальной концентрации электронов (**Рис. 3а**). ТП это двухступенчатый процесс, при котором сначала электрон прилипает к кислороду с образованием нестабильного отрицательного иона $(O_2^-)^*$, а затем происходит тушение в столкновении с третьим телом, которым может быть кислород, азот, либо вода, в результате чего образуется стабильный ион O_2^- . В наших условиях для всех трёх реакции $O_2 + e + O_2(H_2O, N_2) \xrightarrow{K_{1,2,3}} O_2^- + O_2^*(H_2O^*, N_2^*)$, скорость гибели электронов будет описывать общее время $\tau_{att} = [N_{O_2}(k_1 N_{O_2} + k_2 N_{H_2O} + k_3 N_{N_2})]^{-1}$.

Поскольку обзор литературы в **Главе 1** показал, что имеется существенный разброс данных по времени τ_{att} , одной из задач работы было его прямое измерение в зависимости от напряженности приложенного постоянного электрического поля и влажности воздуха.

Для этого было снято семейство осциллограмм с начальной концентраций электронов $N_e^0 \sim 10^{12}$ см $^{-3}$ в различных электростатических полях в диапазоне 0.2÷8 кВ/см для трёх значений относительной влажности воздуха: 0%, 17% и 94%. Типичные экспериментальные кривые представлены на **Рис. 3а**. Аппроксимируя их экспоненциальной зависимостью $N_e(t) = N_e^0 \exp(-t/\tau_{att})$ напрямую измерялось характерное время трехчастичного прилипания τ_{att} .

Полученные зависимости τ_{att} от напряженности электрического поля при температуре $T = 21$ °С и различной влажности приведены на **Рис. 3б**. Как видно, время прилипания вне зависимости от влажности воздуха быстро растет при росте напряженности поля до ~ 3.5 кВ/см, а затем следует насыщение. Природа

насыщения связана с падением эффективности нагрева электронов внешним полем за счет неупругого возбуждения электронных уровней молекулярного азота. При этом влажность воздуха оказывает существенное влияние на время жизни электронов: при содержании молекул воды $\sim 2.3\%$ характерное время прилипания уменьшается вдвое, по сравнению с сухим воздухом, во всём диапазоне электрических полей. Это связано с тем, что трехатомные молекулы воды за счет развитой структуры уровней эффективно снимают возбуждения в столкновениях с нестабильными отрицательными ионами $(O_2^-)^*$, образующимися в результате первичного прилипания. Полученные результаты находятся в хорошем согласии с результатами численного моделирования, сделанного И.В. Сметаниным (сплошные линии на Рис. 3б).

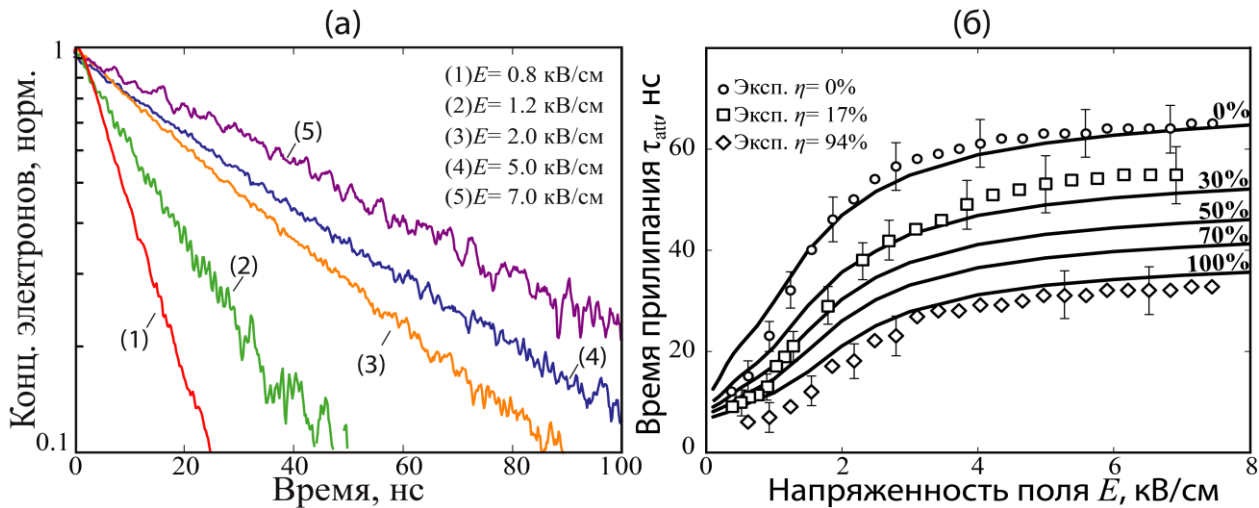


Рис. 3 (а) Нормированные осциллограммы фототока, полученные для фиксированной начальной концентрации электронов $N_e^0 \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и различных электрических полей.

(б) Экспериментальные зависимости характерного времени прилипания электронов в слабоионизованной плазме τ_{att} от напряженности постоянного электрического поля для влажностей воздуха 0%, 17% и 94% (точки) и результаты численного моделирования для различной влажности воздуха, указанной в процентах над (линиями).

В разделе 3.3 экспериментально демонстрируется фотоотрыв залипших электронов от ионов O_2^- , образующихся в результате ТП. Поскольку ионы O_2^- имеют небольшую энергию связи с электроном, ~ 0.5 эВ, УФ лазерное излучение на длине волны 248 нм ($h\nu = 5$ эВ) может эффективно отрывать залипшие электроны. В экспериментах исследовалась ионизация воздуха сдвоенными 25-нс лазерными импульсами KrF лазера, идущими с интервалом 40 или 80 нс. Первый импульс создавал начальную концентрацию электронов $N_e < 10^{14} \text{ см}^{-3}$,

после чего следовало их ТП к кислороду. Второй лазерный импульс, не только производил фотоэлектроны в процессе REMPI но, кроме того, обеспечивал их фотоотрыв от отрицательных молекулярных ионов кислорода, образовавшихся при релаксации плазмы после первого лазерного импульса. Это наблюдалось напрямую, так как амплитуда фототока, а значит и концентрация электронов, от второго, менее интенсивного импульса, была в $1.5 \div 2$ раза больше, чем от первого. При интенсивностях второго импульса больше 10^9 Вт/см² эффективность фотоотрыва была близка к единице, т.е. почти все залипшие электроны оказывались оторваны.

В разделе 3.4 приводятся основные выводы по *Главе 3*. Впервые было экспериментально продемонстрировано, что основную роль при многофотонной ионизации воздуха KrF лазерным излучением играет ионизация водяного пара. Получены уточненные данные по скоростям трехчастичного прилипания электронов к кислороду в воздухе с различной влажностью. Продemonстрирован фотоотрыв электронов от ионов O_2^- 248-нм лазерным излучением.

В *Главе 4* приведено экспериментальное исследование нелинейных процессов при усилении субтераваттных УФ лазерных импульсов в KrF усилителях с накачкой электронным пучком.

В разделе 4.1 проводится обзор литературы по усилению УКИ в многокаскадной гибридной KrF/Ti³⁺:Al₂O₃ лазерной системе “ТАРПУН-МТВ”. В этих экспериментах, предваривших настоящую работу, показано, что при усилении УКИ происходит ограничение выходной энергии лазерных импульсов, не связанное с насыщением усиления в активной среде.

В разделах 4.2-4.5 исследуется природа этого явления, связанного с сильно неоднородным распределением излучения в поперечном профиле лазерного пучка, приводящим к возникновению существенных нелинейных потерь в окнах усилителей и KrF активной среде. По калиброванной люминесценции стеклянной пластины были получены поперечные профили распределения плотности энергии (интенсивности) в лазерном пучке с субтераваттной пиковой мощностью излучения вдоль тракта многопроходового усиления. Было

обнаружено, что при усилении, с ростом мощности излучения, между проходами развивается мелкомасштабная самофокусировка и множественная филаментация излучения. Из поперечного профиля пучка с пиковой мощностью 0.2 ТВт (Рис. 4а), на 3 порядка превышающей критическую мощность самофокусировки ~ 0.1 ГВт для 248 нм излучения в воздухе, были измерены параметры одиночных филаментов. Интенсивность $I_f = (2.0 \pm 0.6) 10^{11}$ Вт/см² и плотность энергии $Q_f = 0.20 \pm 0.06$ Дж/см² в филаментах оказались в 100 раз больше средних по выходной апертуре усилителя значений ($I_{cp} = 2.2$ ГВт/см²; $Q_{cp} = 2$ мДж/см²). В высокоинтенсивные филаменты перераспределялась существенная, до $\xi = 30 \div 40\%$, доля полной энергии импульса.

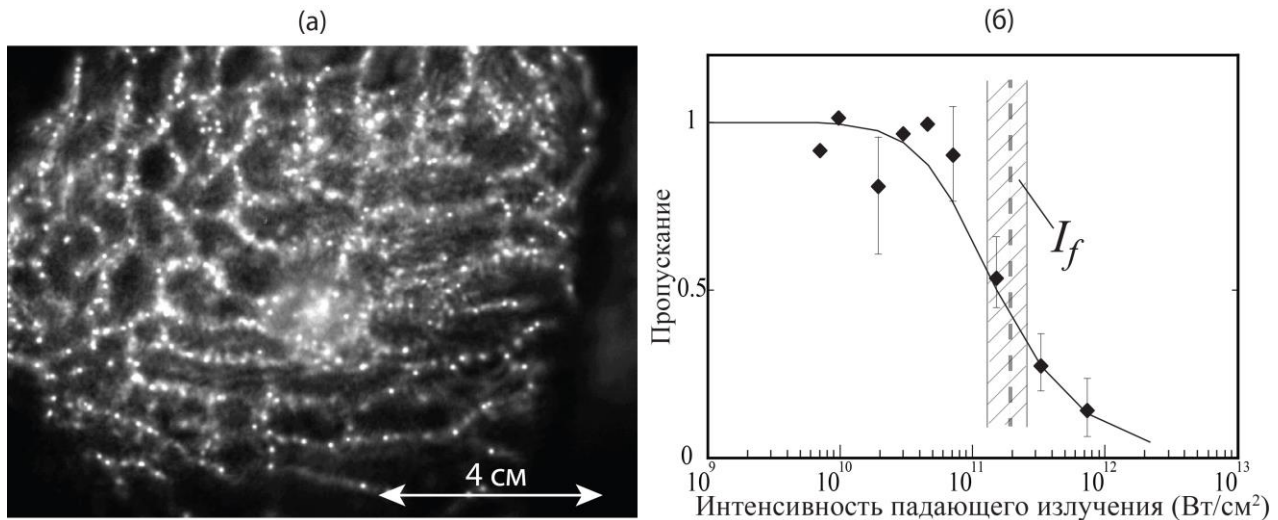


Рис. 4 (а) Профиль пучка усиленного УКИ с пиковой мощностью $P=0.2$ ТВт **(б)** Эксп. зависимость пропускания образца из CaF_2 толщиной 2 см от падающей интенсивности (точки) и аппроксимирующая зависимость для коэффициента трёхфотонного поглощения $\gamma = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{-22} \text{ см}^3/\text{Вт}^2$. Штриховкой отмечен диапазон интенсивностей I_f для филаментов в пучке усиленных УКИ.

Поскольку множественная филаментация развивалась уже между проходами усилителей, это оказывало существенное влияние на нелинейные потери при усилении. Плотность энергии в филаментах $Q_f = 0.20$ Дж/см² на порядок превышала предельную плотность энергии в KrF активной среде $Q_{lim} = 20 \div 40$ мДж/см², рассчитанную из уравнения Франца-Нодвика [12]. Таким

образом филаменты в активной среде должны были не усиливаться, а поглощаться. Помимо потерь в активной среде, филаменты пучка поглощались в толстых окнах усилителей из CaF_2 . В эксперименте, моделирующем распространение одиночных филаментов через окна усилителей, было получено, что при падающих интенсивностях свыше 10^{11} Вт/см^2 , происходит трехфотонное поглощение и рассеяние излучения (**Рис. 4б**). Помимо этого, наблюдалось существенное уширение спектра излучения за пределы полосы усиления. Из этих экспериментов был рассчитан коэффициент нелинейных потерь для 248 нм излучения в CaF_2 $\gamma = (1.1 \pm 0.3) \times 10^{-22} \text{ см}^3 \text{ Вт}^{-2}$. Подставив в формулу для трехфотонного поглощения в CaF_2 $I(L) = \frac{I_0}{(1 + \gamma I_0^2 L / \sqrt{3})}$ измеренную интенсивность в филаменте I_f , можно рассчитать потери одиночного филамента при прохождении через окно усилителя толщиной $L = 4 \text{ см}$, которые составляют $R_f = 90\%$. Из чего можно сделать вывод, что при развитии множественной филаментации в усилительном тракте, что прямо наблюдалось в эксперименте, полные потери энергии лазерного пучка при прохождении толстой оптики приблизительно соответствует доле энергии, содержащейся в филаментах ξ , или с учетом Френелевского отражения $R_{\text{нл}} = 1 - T_F \times (1 - \xi) \approx 40\%$ при $\xi = 35\%$. Эти потери являются основным фактором, ограничивающим выходную энергию при многопроходном усилении УКИ в KrF усилителях.

В разделе 4.6 приводятся основные выводы по **Главе 4**.

В **Главе 5** описывается новая методика подавления множественной филаментации за счет самодефокусировки излучения в ксеноне — среде с резонансно-индуцированным отрицательным нелинейным показателем преломления на длине волны 248 нм. Впервые продемонстрировано полное подавление множественной филаментации в УФ лазерных пучках.

В разделе 5.1 описывается физическая природа отрицательной керровской нелинейности, связанной с наличием двухфотонного резонанса излучения с атомным уровнем. Для KrF излучения оно было впервые предсказано и

экспериментально продемонстрировано при распространении в Хе 248-нм излучения в работе [13].

В разделах 5.2-5.3 описываются эксперименты по подавлению множественной филаментации УФ лазерного пучка при распространении в Хе. В них контролировался профиль пучка (**Рис. 5**) на выходе из ячейки длиной 2.5 м, заполненной воздухом, откачанной до остаточного давления 10^{-2} торр, либо заполненной Хе при давлении $0.1 \div 1$ атм. При пропускании множественных филаментов через ячейку, заполненную Хе, происходила дефокусировка высокоинтенсивных участков пучка и его гомогенизация (**Рис. 5в**).

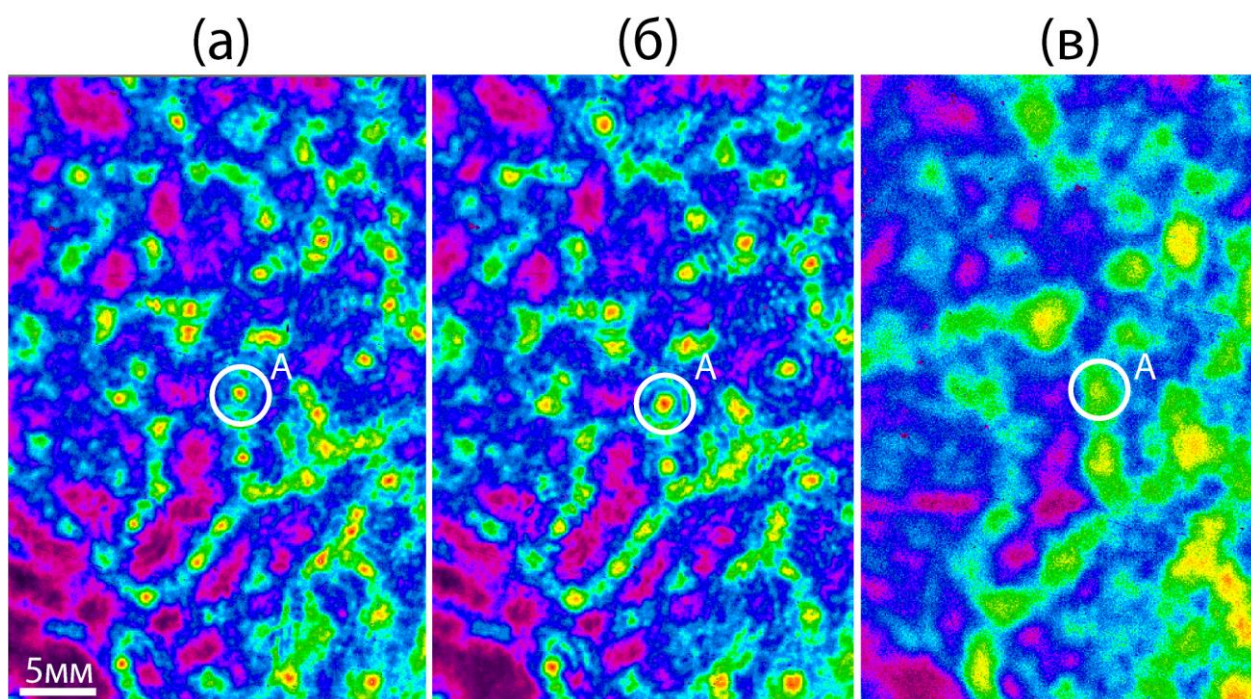


Рис. 5 Один и тот же фрагмент поперечного профиля лазерного пучка, прошедшего через ячейку с (а) воздухом при $p=1$ атм, (б) вакуумом при $p=10^{-2}$ Торр, (в) Хе при $p=0.1$ атм.

Поскольку картина филаментации хорошо воспроизводилась от выстрела к выстрелу, можно оценить, что поперечный размер одиночных филаментов после пропускания через ячейку с Хе увеличивался в ~ 3.6 раза, а интенсивность в филаменте снижалась в ~ 40 раз за счет самодефокусировки и нелинейного поглощения. При подавлении филаментации наблюдалось небольшое улучшение фокусируемости лазерного пучка. В пучке с подавленной

филаментацией 50% энергии фокусировалось с расходимостью 0.14 мрад, на 10-15% меньшей, по сравнению с расходимостью пучка, состоящего из большого числа филаментов.

Из-за того, что нелинейный набег фазы в Хе, формально, отрицательный, пропускание через ксенон не филаментированного пучка откладывало область множественной филаментации на расстояние ~50 метров, до тех пор, пока суммарный нелинейный набег фазы в Хе и в воздухе не приобретал положительный знак.

В разделе 5.4 описывается новое нелинейно-оптическое явление, обнаруженное при распространении УФ филаментов в Хе: генерация узконаправленной конической эмиссии на длине волны 828 нм, даются возможные объяснения этому явлению.

В разделе 5.5 даны основные выводы по *Главе 5*. Экспериментально продемонстрировано эффективное подавление множественной филаментации УФ излучения на длине волны 248 нм за счет резонансно индуцированной отрицательной керровской нелинейности в Хе.

В *Заключении* диссертационной работы сформулированы **основные результаты** работы.

III. ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Экспериментально продемонстрировано, что в атмосферном воздухе с содержанием водяных паров более 0.1% основной вклад в фотоионизацию импульсным 248-нм излучением субпикосекундной и наносекундной длительности при лазерных интенсивностях $10^{8\div 5} \times 10^{12}$ Вт/см² дает резонансно-усиленная многофотонная ионизация (REMPI) паров воды.

2. Для наносекундных импульсов с длительностью 25 нс в диапазоне интенсивностей $10^{8\div 3} \times 10^{10}$ Вт/см² в воздухе происходит высокоэффективная (2+1) REMPI ионизация водяного пара с эффективным сечением $\sigma_{H_2O}^{(2)} = (9.0 \pm 5.5) \times 10^{-16}$ см⁴с⁻¹Вт⁻²

3. Для субпикосекундных импульсов длительностью 170 фс в диапазоне интенсивностей $10^{10} \div 5 \times 10^{12}$ Вт/см² в кислороде и парах воды наблюдалась прямая трёхфотонная ионизация, причем ионизация водяного пара происходит с сечением $\sigma_{H_2O}^{(3)} = (5.6 \pm 3.8) \times 10^{-27}$ см⁶с⁻¹Вт⁻³, существенно превышающим сечение для кислорода $\sigma_{O_2}^{(3)} = (1.2 \pm 0.5) \times 10^{-29}$ см⁶с⁻¹Вт⁻³, и сечение REMPI фотоионизации в азоте, $\sigma_{N_2}^{(3)} = (1.7 \pm 0.8) \times 10^{-30}$ см⁶с⁻¹Вт⁻³ протекающей по схеме (3+1).

4. Показано, что основным механизмом гибели электронов в плазме с начальной концентрацией электронов $N_e^0 < 10^{13}$ см⁻³ является трёхчастичное прилипание электронов к молекулярному кислороду. Измеренное время жизни электронов относительно трехчастичного прилипания составило от 5 до 65 нс в зависимости от влажности воздуха и приложенного постоянного электрического поля в диапазоне 0.3÷8 кВ/см.

5. Показано, что при многопроходном усилении субпикосекундных УФ лазерных импульсов с тераваттной пиковой мощностью в Krf усилителях из-за множественной филаментации пучка 30-40% энергии импульса перераспределяется в высокоинтенсивные (0.2 ТВт/см²) филаменты. Стократный рост плотности энергии и интенсивности в филаментах относительно средних по пучку значений приводит к насыщению активной среды и нелинейным потерям в оптических элементах усилителей. Это приводит к насыщению плотности энергии при многопроходном усилении на уровне ~ 2 мДж/см². Измерен коэффициент нелинейных потерь 248-нм лазерного излучения в окнах из CaF₂ $\gamma = 1.1 \times 10^{-22}$ см³Вт⁻², связанный с трехфотонным поглощением и рассеянием излучения за счет ВКР и фазовой самомодуляции.

6. Продемонстрировано эффективное подавление множественной филаментации и улучшение качества лазерного пучка при распространении в атмосферном воздухе субпикосекундных импульсов УФ излучения с пиковой

мощностью до 0.3 ТВт за счет керровской дефокусировки в ячейке с ксеноном, обладающим отрицательным коэффициентом керровской нелинейности вследствие двухфотонного резонанса.

IV. СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации автора в рецензируемых журналах, индексируемых в базе данных Web of Science:

1. V.D. Zvorykin, I.V. Smetanin, N.N. Ustinovskii, **A.V. Shutov**, «Manipulation by multiple filamentation of subpicosecond TW KrF laser beam», *Applied Physics B*, **124**:80, 2018.
2. **A.V. Shutov**, N.N. Ustinovskii, I.V. Smetanin, D.V. Mokrousova, S.A. Goncharov, S.V. Ryabchuk, E.S. Sunchugasheva, L.V. Seleznev, A.A. Ionin, V.D. Zvorykin, «Major Pathway for Multiphoton air ionization at 248 nm laser wavelength», *Applied Physics Letters*, **111** (22), 224104, 2017.
Erratum: *Applied Physics Letters*, **113** (18), 189902, 2018.
3. В.Д. Зворыкин, С.А. Гончаров, А.А. Ионин, Д.В. Мокроусова, С.В. Рябчук, Л.В. Селезнев, Е.С. Сунчугашева, Н.Н. Устиновский, **А.В. Шутов**, «Экспериментальные возможности лазерной Ti: сапфир – KrF-системы ГАРПУН-МТВ для исследования взаимодействия субпикосекундных УФ импульсов излучения с мишенями», *Квантовая электроника*, **47**, 319-326, 2017.
4. V.D. Zvorykin, S.A. Goncharov, A.A. Ionin, D.V. Mokrousova, S.V. Ryabchuk, L.V. Seleznev, **A.V. Shutov**, I.V. Smetanin, E.S. Sunchugasheva, N.N. Ustinovskii, «Kerr self-defocusing of multiple filaments in TW peak power UV laser beam», *Laser Physics Letters*, **13**, 125404, 2016.
5. I.V. Smetanin, A.O. Levchenko, **A.V. Shutov**, N.N. Ustinovskii, V.D. Zvorykin, «Role of coherent resonant nonlinear processes in the ultrashort KrF laser pulse propagation and filamentation in air», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **369**, 87-91, 2016.
6. В.Д. Зворыкин, А.А. Ионин, А.О. Левченко, Л.В. Селезнев, Д.В. Сеницын, И.В. Сметанин, Н.Н. Устиновский, **А.В. Шутов**, «Протяженные плазменные

каналы в воздухе, созданные УФ лазером и их применение для управления электрическими разрядами», *Физика Плазмы*, **41**, 125-162, 2015.

7. V.D. Zvorykin, A.A. Ionin, A.O. Levchenko, L.V. Seleznev, **A.V. Shutov**, D.V. Sinitsyn, I.V. Smetanin, N.N. Ustinovskii, «Multiple filamentation of supercritical UV laser beam in atmospheric air», *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, **355**, 227-231, 2015.

8. V.D. Zvorykin, A.A. Ionin, A.O. Levchenko, L.V. Seleznev, D.V. Sinitsyn, I.V. Smetanin, N.N. Ustinovskii, **A.V. Shutov**, «Directed transfer of MW radiation in sliding-mode plasma waveguides produced by UV laser in atmospheric air», *Applied Optics*, **53** (31), I31-I40, 2014.

9. В.Д. Зворыкин, А.А. Ионин, А.О. Левченко, Г.А. Месяц, Л.В. Селезнев, Д.В. Синицын, Н.Н. Устиновский, **А.В. Шутов**, «Лазерная гибридная Ti : сапфир – KrF-система, генерирующая цуг субтераваттных УФ импульсов субпикосекундной длительности», *Квантовая Электроника*, **44**, (5), 431-439, 2014.

10. **A.V. Shutov**, I.V. Smetanin, A. A. Ionin, A.O. Levchenko, L.V. Seleznev, D.A. Sinitsyn, N.N. Ustinovskii, V.D. Zvorykin, «Direct measurement of the characteristic three-body electron attachment time in the atmospheric air in direct current electric field», *Applied Physics Letters*, **103**, 034106, 2013.

11. V.D. Zvorykin, A.O. Levchenko, **A.V. Shutov**, E.V. Solomina, N.N. Ustinovskii, I.V. Smetanin, «Long-Distance Directed Transfer of Microwaves in Tubular Sliding-Mode Plasma Waveguides Produced by KrF Laser in Atmospheric Air», *Physics of Plasmas*, **19**, 033509, 2012.

В работах [2, 6, 10, 11] опубликованы основные результаты из *Главы 3*. В работах [5, 7-9] опубликованы основные результаты из *Главы 4*. В работах [1, 3, 4] опубликованы основные результаты из *Главы 5*. Другие результаты, опубликованные в этих работах, не входят в диссертацию.

Публикации автора по теме диссертации в материалах конференций:

1. А.В. Шутов, «Нелинейные процессы в оптических материалах и их влияние на усиление субпикосекундных УФ лазерных импульсов в KrF усилителях», Тезисы докладов «XV Школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики», ФИАН, Москва, с. 263, 2014 г.

2. A. V. Shutov, A. A. Ionin, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, E. S. Sunchugasheva, N.N. Ustinovskii, V.D. Zvorykin, «Multiple UV filamentation mitigation in Xenon», LasPhys'16, доклад S5.3.4 (сборник тезисов конференции на цифровом носителе), 2016 г.
3. A. V. Shutov, A. A. Ionin, D. V. Mokrousova, L. V. Seleznev, I.V. Smetanin, E. S. Sunchugasheva, N.N. Ustinovskii, V.D. Zvorykin, «Multiple UV filamentation suppression in Xenon», Журнал прикладной спектроскопии, **83** (6-16), стр. 286, 2016 г.
4. A.V. Shutov, A.O. Levchenko, D.V. Mokrousova, N.N. Ustinovskii, V.D. Zvorykin, «Role of Water in Air Ionization at KrF Laser Wavelength» LasPhys'17, доклад PS5.5 (сборник тезисов конференции на цифровом носителе), 2017 г.
5. A.V. Shutov, I.V. Smetanin, N.N. Ustinovskii, A.A. Ionin, V.D. Zvorykin, «Three body attachment of electrons in humid air» Тезисы докладов «UltrafastLight-2018», стр. 177, 2018 г.
6. A.V. Shutov, I.V. Smetanin, N.N. Ustinovskii, V.D. Zvorykin, «Extremely effective air photoionization through water vapor at 248 nm laser wavelength» 2018 International Conference Laser Optics, Proceedings Paper, доклад ThR8-45, стр. 325, 2018 г. (DOI: 10.1109/LO.2018.8435552);
7. A.V. Shutov, «The electron attachment and mobility data in dry and wet air for air-filled ionization chambers» Тезисы докладов «XVII Workshop On Nuclear Physics (WONP-XVII)», стр. 37, 2019 г.

V. ЦИТИРУЕМАЯ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРА

1. R. Betti, C.D. Zhou, K.S. Anderson, L.J. Perkins, W. Theobald, and A.A. Solodov, «Shock Ignition of Thermonuclear Fuel with High Areal Density» *Phys. Rev. Lett.* **98**, 155001, 2007
2. C.W. Von Rosenberg Jr., «KrF driver system architecture for a laser fusion power plant», *Fusion Technol.*, **21**, 1600-1604, 1992
3. Г.А. Аскарьян, «Воздействие градиента поля интенсивного электромагнитного луча на электроны и атомы», *ЖЭТФ*, т. **42**, с. 1567, 1962
4. В.И. Таланов, «Самофокусировка электромагнитных волн в нелинейных средах», *Изв. ВУЗов, Радиоф.*, т. **7**, с. 564, 1964

5. A. Braun, G. Korn, X. Liu, D. Du, J. Squier, G. Mourou, «Self-channeling of high-peak-power femtosecond laser pulses in air», *Opt. Lett.*, **20**, p. 73, 1995
6. S.L. Chin, S.A. Hosseini, W. Liu, Q. Luo, F. Theberge, N. Aközbek, A. Becker, V.P. Kandidov, O.G. Kosareva, H. Schroeder, «The propagation of powerful femtosecond laser pulses in optical media: physics, applications, and new challenges», *Can. J. of Phys.*, v. **83**, p. 863, 2005
7. A. Couairon, A. Mysyrowicz, "Femtosecond filamentation in transparent media", *Phys. Rep.*, **441**, p. 47, 2007
8. Л.В. Келдыш, «Ионизация в поле сильной электромагнитной волны», *ЖЭТФ*, т. **47**, с. 1945, 1964
9. I.A. McIntire, C.K. Rhodes, «High power ultrafast excimer lasers», *J. Appl. Phys.*, **69**, R1, 1991
10. Y. Owadano, I. Okuda, Y. Matsumoto, I. Matsushima, E. Takahashi, E. Miura, H. Yashiro, T. Tomie, K. Kuwahara, M. Shinbo, «Overview of “Super-ASHURA” KrF Laser Program», *Fusion Eng. Des.*, **44**, 91-96, 1999
11. G. Meijer, J.J. Ter Meulen, P. Andresen, A. Bath, «Sensitive quantum state selective detection of H₂O and D₂O by (2+1)-resonance enhanced multiphoton ionization» *J. Chem. Phys.*, 85, 6914-6922, 1986
12. L.M. Franz, J.S. Nodvik, «Theory of Pulse Propagation in a Laser Amplifier», *J. Appl. Phys.*, **34**, 2346, 1963
13. R.H. Lehmberg, C.J. Pawley, A.V. Deniz, M. Klapisch, Y. Leng, «Two-photon resonantly-enhanced negative nonlinear refractive index in Xenon at 248 nm», *Opt. Commun.*, **121**, 78-88, 1995